矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol.45 No.3, May, 2026

长英质岩浆的分异机制——来自阿巴拉契亚地壳剖面的证据

刘泽[1],朱弟成[1,2]

1. 地质过程与成矿预测全国重点实验室,中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;
2. 中国地质大学 深时数字地球前沿科学中心,北京 100083

摘　要: 大陆地壳的形成存在一个基本的岩石学矛盾:大陆地壳物质本质上来源于地幔,但地幔部分熔融的产物是玄武质岩浆,而大陆地壳的主体却由安山质-长英质岩石构成。玄武质岩浆主要在下地壳(>700 MPa)通过高压分异形成安山质岩浆。然而,关于这种熔体从深部源区抽离后,在中-上地壳经历了何种分异机制进而演化为长英质岩浆的问题目前仍缺乏直接的地质约束。造成这一问题的主要原因是缺乏能够连续记录岩浆演化路径的天然地壳剖面。近期有研究在美国新英格兰地区的阿巴拉契亚造山带识别出一条厚度约24 km(深度4~28 km)的中-上地壳连续剖面。该地壳剖面具有从下(700 MPa)到上(100 MPa)连续的成分分层。这一特征表明变压分离结晶可能是驱动安山质岩浆在中-上地壳演化为长英质岩浆的关键机制。该研究成果为穿地壳岩浆系统模型提供了重要的地质实证。

关　键　词: 岩浆分异;变压分离结晶;阿巴拉契亚;地壳剖面;Kinsman岩套

中图分类号: P588.11　　**文章编号:** 1007-2802(2026)03-0965-05　　**doi:** 10.3724/j.issn.1007-2802.20260020

Differentiation mechanisms of felsic magmas: Evidences from an Appalachian crustal section

LIU Ze[1], ZHU Di-cheng[1,2]

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China;*
2. *Frontiers Science Center for Deep time Digital Earth, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*

Abstract: A fundamental petrological paradox exists regarding the formation of the continental crust: the partial melting of the mantle produces basaltic magmas, whereas the continental crust is predominantly composed of andesitic to felsic rocks. Previous studies indicate that basaltic magmas primarily generate andesitic magmas via high-pressure differentiation within the lower crust (>700 MPa). However, the differentiation mechanisms responsible for evolving these andesitic magmas into felsic magmas in the middle-to-upper crust, after their extraction from deep source regions, are not well-constrained by direct geological evidence. The primary reason for this knowledge gap is the scarcity of natural crustal sections that continuously recorded magmatic evolutionary paths. A recent study identified an about 24 km-thick (4~28 km in depth) continuous section of the middle-to-upper crust in the Appalachian orogeny of New England, USA. This section exhibits continuous compositional stratification from the bottom (700 MPa) to the top (100 MPa). This feature demonstrates that polybaric fractional crystallization could be a key mechanism driving the further evolution of the andesitic magma into felsic magma within the middle-to-upper crust. This study provides critical

收稿编号:2026-0016,2026-01-09 收到,2026-01-27 改回
基金项目:国家自然科学基金资助项目(42572054,42121002);高等学校学科创新引智基地项目(B18048)
第一作者简介:刘泽(1993—),男,博士,副教授,研究方向:造山带岩浆作用与地质过程. email:zeliu_cugb@163.com

引用此文:
刘泽,朱弟成. 2026. 长英质岩浆的分异机制——来自阿巴拉契亚地壳剖面的证据. 矿物岩石地球化学通报,45(3):965–969
Liu Z,Zhu D C. 2026. Differentiation mechanisms of felsic magmas: Evidences from an Appalachian crustal section. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,45(3):965–969

geological evidence for the trans-crustal magmatic system model.

Key words: magma differentiation; polybaric fractional crystallization; Appalachians; crustal section; Kinsman suite

0 引言

地幔部分熔融主要产生玄武质熔体(Schmidt and Jagoutz,2017),而大陆地壳的平均成分则呈安山质-英安质(Rudnick and Gao,2003;Hacker et al.,2015;朱弟成等,2025)。这一成分差异表明,原始岩浆在形成大陆地壳的过程中必须经历显著的分异演化。

Hildreth(1981)提出的MASH模型(Melting,Assimilation,Storage,and Homogenization)认为,幔源岩浆的早期分异主要发生在下地壳或壳幔过渡带。这一观点得到了多项地质证据的支持。第一,在弧地壳剖面(如Kohistan、Talkeetna和冈底斯)底部广泛出露有作为分异产物的超镁铁质-镁铁质堆晶(如辉石岩、角闪石岩、石榴子石岩和纯橄岩)(Greene et al.,2006;Jagoutz,2010;Guo et al.,2020)。第二,南加州内华达岩基的构造面理产状随深度的变化表明,岩浆在700~800 MPa处发生了从垂直运移到水平展布的流变学转换(Klein and Jagoutz,2021)。第三,实验岩石学数据显示,弧英安岩的多相饱和点压力约为700~900 MPa(Blatter et al.,2017)。

尽管下地壳的分异过程已得到较好的刻画,但安山质熔体脱离深部岩浆房进入中-上地壳后的演化机制仍不明晰。传统的“单一岩浆房降温分异”模型(Bateman and Chappell,1979)正逐渐被基于地球物理观测提出的“穿地壳岩浆系统”模型所取代。后者认为岩浆在地壳尺度的运移是一个多层级的抽取与演化过程(Cashman et al.,2017;马昌前等,2024)。然而,该模型目前主要建立在地球物理探测与地球化学反演基础之上,亟需来自野外露头的直接地质证据,以证实岩浆在减压上升过程中成分随压力的演变规律。

解决这一问题的关键在于寻找到记录了中-上地壳岩浆连续演化的地质剖面。现已发现的经典剖面(如Kohistan和Talkeetna)多发育于大洋弧环境,且其中-上地壳成分的均一化程度高(Jagoutz,2014)。而大陆弧剖面(如Famatinian和冈底斯)通常主要出露中-下地壳部分,缺乏中-上地壳的连续记录(Otamendi et al.,2012;骆必继等,2025)。因此,在大陆背景下识别出保留清晰岩浆演化序列的中-上地壳连续剖面,对于理解长英质岩浆的分异机制具有重要意义(朱弟成等,2018;马昌前等,2024)。

1 阿巴拉契亚地壳剖面:中-上地壳演化的天然实验室

Liu等(2025)选取美国新英格兰地区阿巴拉契亚造山带的Kinsman岩套作为研究对象。该岩套形成于阿巴拉契亚造山旋回中的阿卡迪亚造山期(约403 Ma),属于同构造岩浆岩(图1a)。岩套中的Cardigan岩基是该岩套中最大的岩体(图1b)。

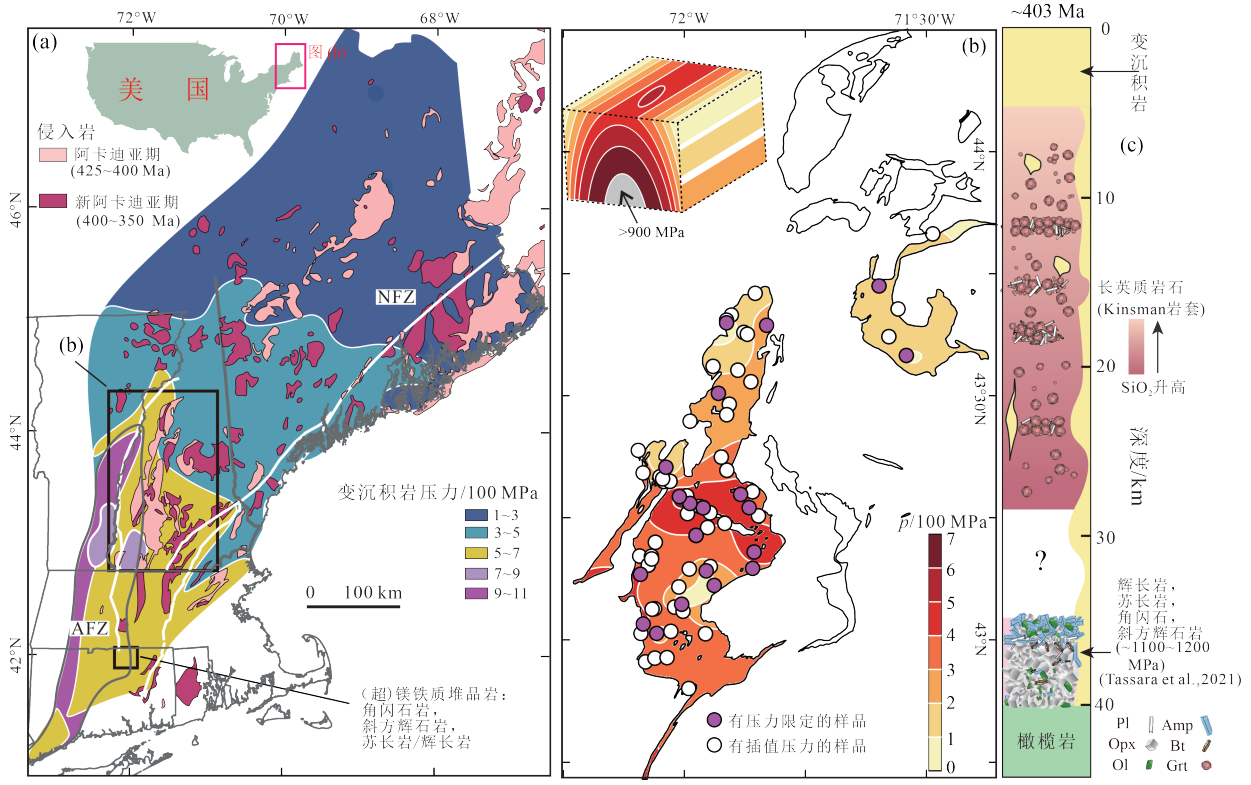
阿巴拉契亚造山带目前已经彻底垮塌。该区域独特的构造抬升与剥露历史使得Cardigan岩基的垂向剖面得以倾斜出露。Liu等(2025)利用详细的矿物地质压力计(包括石榴子石-黑云母-白云母-斜长石及单石榴子石压力计)对岩体进行了古侵位压力重建。结果显示,现今地表出露的岩石记录了从100~700 MPa的连续压力变化,对应约4~28 km的地壳深度(图1b、1c)。这一厚度达24 km的连续剖面涵盖了整个中-上地壳,为直接观测岩浆在上升运移过程中的成分演化提供了宝贵的机遇。

在该剖面中,岩性由深部的富石榴子石花岗闪长岩向浅部的含石榴子石二云母花岗岩连续演化。在矿物组合上,斜长石、石英和黑云母贯穿整个Kinsman剖面,而白云母和钾长石则在浅部逐渐增多(Liu et al.,2025)(图1c)。与全球其它经典的岩浆弧地壳剖面相比,Kinsman剖面具有显著的独特性。Kohistan(Jagoutz,2010)、Talkeetna(Greene et al.,2006)、Sierra Nevada(Saleeby,1990)、Calabria(Fiannacca et al.,2017)和里龙(骆必继等,2025)剖面的岩性主体为偏铝质。其中-上地壳岩石主要为发育含角闪石的英云闪长岩-花岗闪长岩。不同的是,Kinsman剖面上主体岩石为具有强过铝质的闪长岩-二长花岗岩(Liu et al.,2025)。其特征矿物组合为石榴子石+黑云母+白云母,而缺失角闪石。这一独特的矿物学和地球化学特征使其成为揭示强过铝质岩浆在中-上地壳形成和分异的稀缺天然样本。

2 变压分离结晶:驱动岩浆在中-上地壳分异的机制

2.1 成分的垂向分层与控制因素

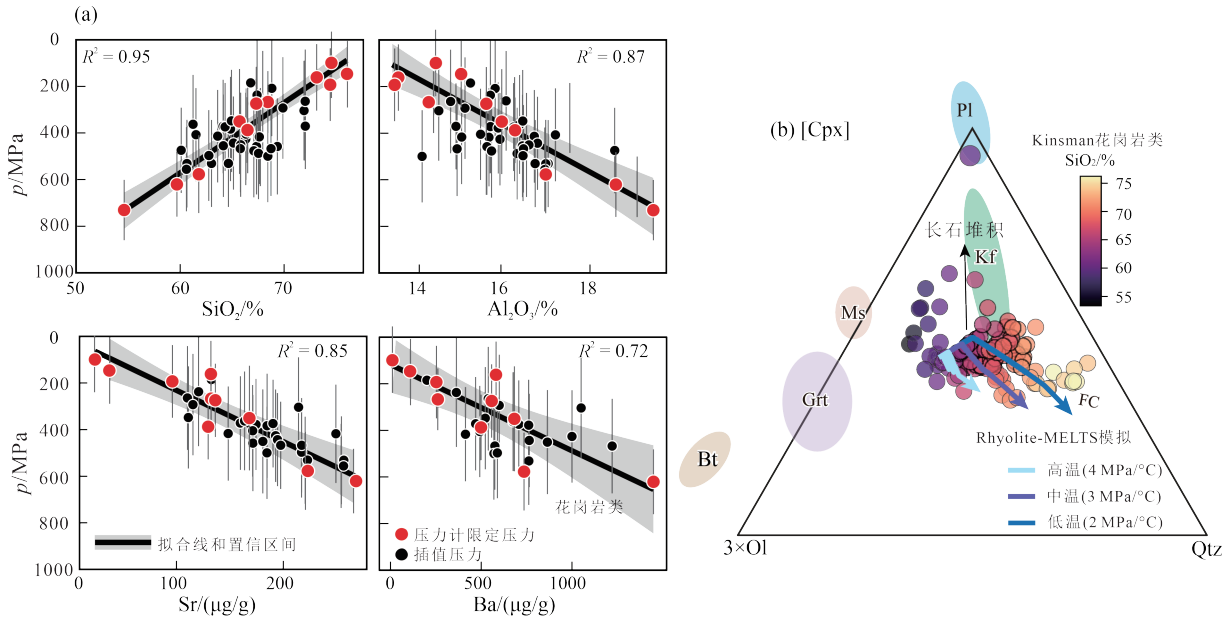
Cardigan岩基在垂向上表现出规律性的成分分层。随着侵位压力的降低(即深度的减小),全岩成分中SiO_2含量逐渐升高,而TiO_2、Al_2O_3、TFeO(全铁)、CaO、Sc、Sr、Ba及Yb含量则呈系统性降低(图2a)。



(a)阿巴拉契亚造山带新英格兰地区变沉积岩压力和岩浆作用分布图(改自Hillenbrand and Williams,2021);(b)Kinsman岩套的压力等值线图。左上角插图示意了Cardigan岩体的构造几何学特征;(c)基于压力数据重建的约403 Ma时期的地壳剖面柱状图,展示了Kinsman长英质岩套SiO_2含量随深度减小而逐渐增加的特征;地壳剖面底部推测为同期的超镁铁-镁铁质堆晶岩(Tassara et al.,2021)。详细的压力数据结果请见Liu等(2025)。AFZ—Ammonoosuc压扭断层带;Amp—角闪石;Bt—黑云母;Grt—石榴子石;NFZ,Norumbega压扭断层带;Ol—橄榄石;Opx—斜方辉石;Pl—斜长石

图1　阿巴拉契亚造山带新英格兰地区的地质背景与地壳剖面重建

Fig.1　Geological background and reconstructed crustal section of the Appalachian orogen in New England,USA



(a)结晶压力与全岩成分(SiO_2、Al_2O_3、Sr和Ba)的相关性图解;(b)投影自单斜辉石(Cpx)、正长石和Fe-Ti-Cr氧化物的标准矿物分子数为三元斜长石(Pl)–3×橄榄石(Ol)–石英(Qtz)图解(据Grove,1993);(c)彩色箭头代表Rhyolite-MELTS在不同热梯度(高温、中温和低温路径)下模拟的液体血统线(LLD)。详细的压力数据、全岩-矿物地球化学数据和模拟结果请见Liu等(2025)。
矿物符号:Bt—黑云母;Grt—石榴子石;Kf—钾长石;Ms—白云母

图2　Kinsman岩套随压力变化的地球化学特征及热力学模拟结果

Fig.2　The variation of geochemical characteristics with varying pressures and the thermodynamic modeling results of the Kinsman suite

Liu等(2025)证实，上述成分变化受控于变压分离和结晶作用。岩浆在减压上升过程中，相平衡状态发生改变，导致结晶矿物组合随压力发生变化：(1)在高压阶段，石榴子石与斜长石率先饱和并分离；(2)随着温度和压力的降低，黑云母、白云母、石英及钾长石依次加入结晶序列。这一矿物结晶序列与利用Perple_X和Rhyolite-MELTS进行的热力学模拟结果高度吻合(图2b)。

进一步的模拟结果表明，岩浆的上升路径($\Delta p/\Delta t$)是控制岩浆分异程度的关键变量。对比不同地温梯度的模拟路径发现，Kinsman岩套的地球化学演化趋势与低温(2 MPa/℃)及中温(3 MPa/℃)路径最为匹配，而显著偏离高温路径(4 MPa/℃)(图2b)。这表明，岩浆的分异效率和结晶矿物组合取决于上升速率与冷却速率之间的耦合关系。该结论与最新的变压分离结晶实验(Marxer et al.，2022)以及西藏冈底斯弧里龙剖面的研究结果(骆必继等，2025)相一致。

2.2 对强过铝质花岗岩成因的再认识

Kinsman岩套具有强过铝质特征，其ASI［摩尔分数$Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O-3.3P_2O_5)$］均值为1.3。这一地球化学特征常被认为是变沉积岩深熔的证据。前人通过对与Kinsman同期的美国Connecticut的Hf-O-S-Os同位素的研究表明，这些超镁铁质-镁铁质堆晶岩的原始母岩浆在下地壳混染了5%~35%贫钙和贫钠的泥质岩(Tassara et al.，2021，2024；Tassara and Ague，2022)。这些超镁铁质-镁铁质堆晶岩具有和Kinsman岩套相似的年龄和锆石Hf同位素组成。此外，整个新英格兰地区还未识别出与Kinsman岩套同期的混合岩。因此，Kinsman岩套和Connecticut超镁铁质-镁铁质堆晶岩极有可能在岩石成因上是相关联的，即具有共同的母岩浆。如果这种解释合理，那么地壳混染是导致岩浆向过铝质演化的初始关键因素。此外，混染还原的变沉积岩会显著降低岩浆氧逸度($\Delta FMQ<-2.8$)。这种还原环境与过铝质成分共同抑制了角闪石结晶，但促进了石榴子石结晶(Cawthorn and Brown，1976)。综上，该研究认为地壳混染叠加变压分离结晶可以形成强过铝质花岗岩类。

3 启示与未来研究方向

本研究通过重建Kinsman岩套的地壳剖面，证实了变压分离结晶是中-上地壳岩浆分异的关键机制，为穿地壳岩浆系统模型提供了直接的地质实证。基于此，未来的研究可从以下几个方面进一步深入：

(1)拓展地壳剖面研究的广度：尽管Kinsman剖面提供了范例，但全球范围内保存完好的中-上地壳连续剖面仍较为稀少。未来应重点在增生型、碰撞型等不同构造背景下搜寻类似的地质剖面，以检验变压分离结晶机制的普适性。

(2)聚焦晶体-熔体分离的动力学机制：变压分离结晶模型的前提是熔体在上升过程中能持续有效地从岩浆中分离。在中-上地壳高黏度流变环境下，构造应力、剪切作用及流体挥发分如何协同克服晶体-熔体密度差，实现高效分离，是亟待解决的物理难题，需要岩石物理学与地球化学反演的深度交叉。

(3)应用非传统同位素示踪岩浆过程：鉴于强过铝质特征的多阶段成因，引入K、Ba和Zr等非传统稳定同位素手段，有望更精细地量化地壳物质的贡献比例，解耦源区继承性与岩浆演化过程的叠加效应。

(4)强化多场耦合数值模拟：岩浆上升路径($\Delta p/\Delta t$)对分异过程具有决定性影响。未来研究应结合区域构造背景，开展热-机械-化学耦合数值模拟，定量解析岩浆通量、断裂几何学特征及围岩流变性质对岩浆上升速率和热历史的控制作用。

作者贡献声明： 刘泽，论文构思、图表绘制、参考文献收集及整理、论文撰写及修改；朱弟成，论文构思、撰写及修改。

利益冲突声明： 作者保证本文无利益冲突。

致谢： 衷心感谢周新华老师的邀稿。也感谢编辑和评审专家对本论文提供的宝贵意见！

参考文献（References）：

Bateman P C, Chappell B W. 1979. Crystallization, fractionation, and solidification of the Tuolumne intrusive series, yosemite National Park, California. Geological Society of America Bulletin, 90(5): 465–482

Blatter D L, Sisson T W, Ben Hankins W. 2017. Voluminous arc dacites as amphibole reaction-boundary liquids. Contributions to Mineralogy and Petrology, 172(5): 27

Cashman K V, Sparks R S J, Blundy J D. 2017. Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. Science, 355(6331): eaag3055

Cawthorn R G, Brown P A. 1976. A model for the formation and crystallization of corundum-normative calc-alkaline magmas through amphibole fractionation. The Journal of Geology, 84(4): 467–476

Fiannacca P, Ortolano G, Pagano M, Visalli R, Cirrincione R, Zappalà L. 2017. IG-Mapper: A new ArcGIS® toolbox for the geostatistics-based automated geochemical mapping of igneous rocks. Chemical Geology, 470: 75–92

Greene A R, DeBARI S M, Kelemen P B, Blusztajn J, Clift P D. 2006. A detailed geochemical study of island arc crust: The talkeetna arc section, south–central Alaska. Journal of Petrology, 47(6): 1051–1093

Grove T L. 1993. Corrections to expressions for calculating mineral components in “Origin of calc-alkaline series lavas at medicine lake volcano by fractionation, assimilation and mixing” and “Experimental petrology of normal MORB near the Kane fracture zone: 22°–25°N, mid-

Atlantic ridge". Contributions to Mineralogy and Petrology, 114(3): 422–424

Guo L, Jagoutz O, Shinevar W J, Zhang H F. 2020. Formation and composition of the Late Cretaceous Gangdese arc lower crust in southern Tibet. Contributions to Mineralogy and Petrology, 175(6): 58

Hacker B R, Kelemen P B, Behn M D. 2015. Continental lower crust. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 43: 167–205

Hildreth W. 1981. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86(B11): 10153–10192

Hillenbrand I W, Williams M L, Li C, Gao H Y. 2021. Rise and fall of the Acadian altiplano: Evidence for a Paleozoic orogenic plateau in New England. Earth and Planetary Science Letters, 560: 116797

Jagoutz O E. 2010. Construction of the granitoid crust of an island arc. Part II: A quantitative petrogenetic model. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(3): 359–381

Jagoutz O. 2014. Arc crustal differentiation mechanisms. Earth and Planetary Science Letters, 396: 267–277

Klein B Z, Jagoutz O. 2021. Construction of a trans-crustal magma system: Building the Bear Valley Intrusive Suite, southern Sierra Nevada, California. Earth and Planetary Science Letters, 553: 116624

Liu Z, Jagoutz O, Molitor Z, Ramezani J, Zhu D C. 2025. Crustal section in the New England Appalachians records polybaric fractional crystallization-driven magma differentiation. Earth and Planetary Science Letters, 671: 119647

骆必继, 宋佳乐, 徐旺春, 王雄, 于帆, 李钰尧, 张宏飞. 2025. 穿地壳岩浆系统与大陆地壳分异: 基于白垩纪冈底斯弧地壳剖面的见解. 岩石学报, 41(12): 4092–4106［Luo B J, Song J L, Xu W C, Wang X, Yu F, Li Y Y, Zhang H F. 2025. Trans-crustal magmatic systems and continental crustal differentiation: Insights from the Late Cretaceous crustal section in eastern Gangdese arc, Xizang. Acta Petrologica Sinica, 41(12): 4092–4106 (in Chinese with English abstract)］

马昌前, 刘彬, 薛振华, 邹博文, 黄贵治, 连泉程, 高珂, 孙洋, 王连训. 2024. 从长英质侵入体揭示火山喷发过程与岩浆通道系统. 岩石学报, 40(7): 1997–2018［Ma C Q, Liu B, Xue Z H, Zou B W, Huang G Z, Lian Q C, Gao K, Sun Y, Wang L X. 2024. Insights into the volcanic eruption process and magmatic plumbing systems from felsic intrusions. Acta Petrologica Sinica, 40(7): 1997–2018 (in Chinese with English abstract)］

Marxer F, Ulmer P, Müntener O. 2022. Polybaric fractional crystallisation of arc magmas: An experimental study simulating trans-crustal magmatic systems. Contributions to Mineralogy and Petrology, 177(1): 3

Otamendi J E, Ducea M N, Bergantz G W. 2012. Geological, petrological and geochemical evidence for progressive construction of an arc crustal section, sierra de Valle Fértil, famatinian arc, Argentina. Journal of Petrology, 53(4): 761–800

Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1–64

Saleeby J B. 1990. Progress in tectonic and petrogenetic studies in an exposed cross-section of young (~100 Ma) continental crust, southern sierra Nevada, California. In: Exposed Cross-Sections of the Continental Crust. Dordrecht: Springer Netherlands: 137–158

Schmidt M W, Jagoutz O. 2017. The global systematics of primitive arc melts. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18(8): 2817–2854

Tassara S, Ague J J, Keller D S, Rooney A D, Wostbrock J A G, Axler J A, Tardani D. 2024. Osmium and oxygen isotope constraints on magma-crust interactions and the transport of copper at the roots of arcs. Chemical Geology, 664: 122301

Tassara S, Ague J J, Valencia V. 2021. The deep magmatic cumulate roots of the Acadian orogen, eastern North America. Geology, 49(2): 168–173

Tassara S, Ague J J. 2022. A role for crustal assimilation in the formation of copper-rich reservoirs at the base of continental arcs. Economic Geology, 117(7): 1481–1496

朱弟成, 王青, 李世民, 詹琼窑, 刘泽, 谢锦程, 刘力, 张亮亮, 钟辛易, 赵宇轩. 2025. 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化. 中国科学: 地球科学, 55(5): 1398–1423［Zhu D C, Wang Q, Li S M, Zhan Q Y, Liu Z, Xie J C, Liu L, Zhang L L, Zhong X Y, Zhao Y X. 2025. Magma genesis and crustal evolution in continental collision zones. Scientia Sinica (Terrae), 55(5): 1398–1423 (in Chinese)］

朱弟成, 王青, 赵志丹, 牛耀龄, 侯增谦, 潘桂棠, 莫宣学. 2018. 大陆边缘弧岩浆成因与大陆地壳形成. 地学前缘, 25(6): 67–77［Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Niu Y L, Hou Z Q, Pan G T, Mo X X. 2018. Magmatic origin of continental arcs and continental crust formation. Earth Science Frontiers, 25(6): 67–77 (in Chinese with English abstract)］